بررسی جوشکاری نقطه ای در اتصالات مشابه فولادهای پیشرفته استحکام بالای مارتنزیتی (AHSS)*

مقاله علمی – پژوهشی

مهران تدین سعیدی[۱]		بابک قربانیان [۲]

چکیده

خواص مکا نیکی جوشها با استفاده از تست ریزسختی و تست کششی برشی بررسی می شود. این روزها برای کاهش وزن خودرو از ورق های استحکام بالای AHSS استفاده می شود. مهمترین روش برای جوش دادن این ورق ها روش جوشکاری نقطه ای مقاومتی (RSW) است. جریان و زمان جوشکاری مهمترین پارامترهای جوشکاری هستند. در این تحقیق، جوش های مشابه فولادهای پیشرفته سخت شونده مارتنزیتی بررسی شده است که با روش جوشکاری نقطه ای مقاومتی (RSW) متصل شده اند. نتایج نشان می دهد، جریان بحرانی ۹٫۵ کیلوآمپر است و در این جریان مد شکست از مد فصل مشترک به مد محیطی تغییر میکند. بیشترین نیروی شکست در ۱۰٫۵ کیلوآمپر اتفاق می افتد و این نیرو حدود ۲۶٫۵ کیلو نیوتن است.

واژه های کلیدی جوشکاری نقطه ای مقاومتی، جوش مشابه، فولادهای پیشرفته سخت شونده مارتنزیتی، خواص مکانیکی، مد شکست.

Investigation of Spot Welding In Similar Joins of Martensitic Advanced High Strength Steels (AHSS)

M.Tadayonsaidi		B.Ghorbanian

Abstract

The mechanical properties of weld were studied by the use microhardness testing and tensile shear testing. These days to reduce vehicle weight use from advanced high strength steels. The most important method for joining this sheets is resistance spot welding (RSW). The welding current and the welding time are the most important parameters of welding. In this research, similar welds of martensitic advanced high strength steels have been studied which they had joined with RSW. Results are showing, the critical current is 9.5KA and in this current the failure mode is changing from interface mode to periphery mode. The most failure force occurs in 10.5KA and this force is about 26.5KN.

Key Words Resistance Spot Welding, Similar Weld, Martensitic Advanced High Strength Steels, Mechanical Properties, Failure Mode.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۶/۸/۱۸و تاریخ پذیرش آن ۹۷/٤/٦ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، استادیار، گروه مهندسی مواد، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج.

(۲) کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

Email: tadayon@kiau.ac.ir

DOI: 10.22067/ma.v31i1.68608

مقدمه

جوشکاری مقاومتی نقطه ای به علت سرعت بالا، سهولت کار و همین طور قابلیت اتوماسیون شدن در صنایع خودروسازی، اتومبیل سازی، هواپیماسازی و ... به کار گرفته می شود [۱,2].

باوجود این مزایا باید بیان کرد که کارخانه ها برای کنترل کردن این فرآیند و همین طور دستیابی به جوش هایی بهینه سالیانه هزینه ی بسیاری می پردازند. جهت تولید یک جوش بدون عیب باید پارامتر های جوشکاری به صورت بهینه انتخاب شود و همچنین شرایط به گونه ای کنترل شود تا مجموعه شرایط بهینه همواره ثابت نگه داشته شوند [۱,3].

در فرآیند های جوشکاری مقاومتی اتصال در سطح توسط حرارت و فشار تواماً انجام می شود. از آنجایی که فلزات دارای مقاومت الکتریکی هستند، پس در اثر عبور جریان گرم شده و دمای آنها افزایش می یابد و اگر این افزایش دما، دمای قطعه را به نقطه ذوب برساند فلز ذوب می شود و گرمای مورد نیاز برای ذوب شدن فلز طبق رابطه (۱) (قانون ژول) تعیین می شود [4,5].

$$Q=RI^2T \qquad (۱)$$

T: دما

R: مقاومت

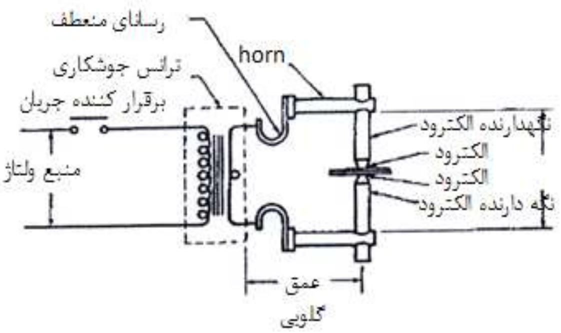
I: جریان

Q: گرمای حاصل شده

با توجه به آنچه ذکر شد فرآیند جوش نقطه ای براساس اعمال یک جریان بالا در بازه ی زمانی کوتاهی صورت می گیرد که پیوستگی آن بوسیله اعمال نیروی فشاری از جانب الکترود ها حاصل می شود. این فرآیند باعث افزایش حرارت موضعی در سطح کوچکی از ورق ها می شود که به نوبه ی خود یک منطقه پلاستیک ایجاد می کند که به خاطر اعمال فشار (بدون جریان تا هنکامی که فلز سرد شود) تغییر شکل در این منطقه ادامه می یابد که نتیجه آن ایجاد یک اتصال دایمی با استحکام بالاست [6].

در صنایع خودروسازی، مقاومت در برابـر تصـادف و برخورد به سوانح به کیفیت و خواص مکانیکی بستگی دارد [7].

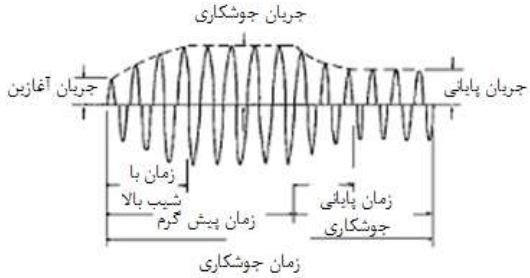
مهمترین معیار ارزیابی کیفیت اتصالات جوشکاری، استحکام کششی- برشی آن هاست. از طرفی، به منظور ایجاد کیفیت مناسب در اتصال قطعات بدنه خودرو لازم است مقدار پارامتر های تنظیمی که باید مورد توجه قرار گیرند عبارتست از: میزان نیرو وارده از الکترود ها، شدت جریان الکتریکی، مدت زمان اعمال جریان، نگه داری پس از قطع جریان و شیب گرم و سرد شدن. بنابراین وجود روشی مناسب به منظور ایجاد ارتباط بین متغیرهای تنظیمی و مشخصات خروجی، ضروری به نظر می رسد. شکل (۱) شمای کلی دستگاه را نشان می دهد [4,5].



شکل ۱دستگاه جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای

دربارهٔ پارامترهای جوشکاری نقطه‌ای تحقیقات زیادی صورت گرفته است.

Tomorrow بیان می کند که بسته به جنس ماده‌ای که جوش داده می شود و وسایل متالورژیکی مربوط به آن چند سیکل مقاومتی را می توان طراحی کرد. ساده ترین سیکلی که درمورد فولاد های کم کربن استفاده می شود را می توان در شکل (۲) مشاهده کرد.در این سیکل، زمانی برای پیش گرم و عملیات حرارتی و پس گرم در نظر گرفته شده است [8].



شکل ۲ سیکل جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای برای فولاد کم کربن [9]

Khan, Tee, Ghosh و همکارانشان معتقدند که استحکام جوش نقطه ای تابعی از عواملی نظیر قطر ناحیه جوش و نفوذ پذیری است و به طور کلی استحکام جوش با افزایش قطر دکمه جوش افزایش می‌یابد [10,14,15].

برای بدست آوردن یک اندازه جوش مشخص، زمان جوشکاری و توان حرارتی وابستگی متقابل دارند زیرا مقدار مشخص انرژی برای ذوب لازم است. بنابراین با ثابت بودن مقدار انرژی، حجم ماده ای که ذوب می شود نیز ثابت است [11].

همواره مقداری جدایش بین دو ورق وجود دارد که دلیل آن هم انبساط وانقباض ناحیه جوش است. Khan و همکارانش معتقدند که با بیرون زدن مذاب از محیط جوش به دلایل مختلفی چون آلودگی سطحی، جفت شدن نامناسب و یا استفاده از برنامه جوشکاری نامناسب می باشد. بیرون زدگی مذاب علاوه بر تاثیر روی جدایش موجب بروز حفره در دکمه جوش نیز می شود. اما ترک ها و تخلخل ها و یا حفرات تقریبا در تمامی جوش های محصولات صنعتی وجود دارند و اگر نزدیک به مراکز دکمه باشند عموما تاثیر کمی بر استحکام دارند [12,13].

بررسی های انجام شده بر جوش پذیری فولادهای سخت شونده بیشتر به منظور بهینه کردن فرآیند می باشد.

Weber و همکارانش قابلیت فرآیند جوشکاری نقطه ای را بررسی کردند و مهمترین نتیجه ی این تحقیقات اثبات قابل اطمینان بودن جوش های فولادهای استحکام بالا با فرآیند RSW بود [16].

Tawada و همکارانش با انجام آزمایشات روی فولاد DP600 توانستند پروفیلی برای جریان جوشکاری ارائه دهند. آنها همچنین نشان دادند که با حذف پوشش روی در پالس ابتدایی، خواص بهبود می یابد [17].

Pouranvaria و همکارانش بر روی مدهای شکست در فولادهای استحکام بالای مارتنزیتی کار کرده اند. تحقیقات آنها نشان می دهد که با افزایش جریان جوشکاری، احتمال شکست محیطی افزایش می یابد. اما در جریان های پایین نیز با تمپر کردن همزمان می توان احتمال شکست فصل مشترکی را کاهش داد [18,19].

با وجود تحقیقات گسترده، هنوز زمینه برای بررسی تاثیرات جوشکاری نقطه ای مقاومتی فولادهای سخت شونده وسیع است.

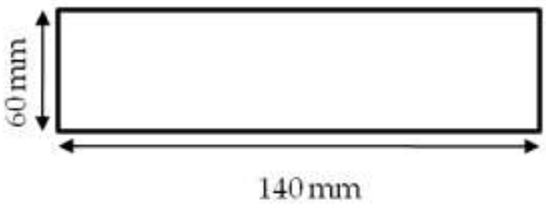
مواد و روش تحقیق

در بین فولادهای استحکام بالای مارتنزیتی، فولادهای چند فازی مارتنزیتی بیشترین استحکام کششی را دارند. این فولادها شامل عناصری مانند، منیزیم، سیلیسیم، کروم و... هستند که حضور این عناصر به منظور افزایش سختی پذیری است و کربن نیز برای افزایش استحکام به کار می رود. انتخاب فولاد در این آزمایش بر اساس ترکیب شیمیایی ذکر شده است. به این منظور از فولادهای میکروآلیاژی کم کربن st52 استفاده گردید. نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی این ورق به صورت کوانتومتری در جدول۱ آورده شده است.

جدول ۱ مشخصات شیمیایی فولاد

فولاد	C	Mg	Si	S	P
St52	0.14	0.48	0.06	0.03	0.002

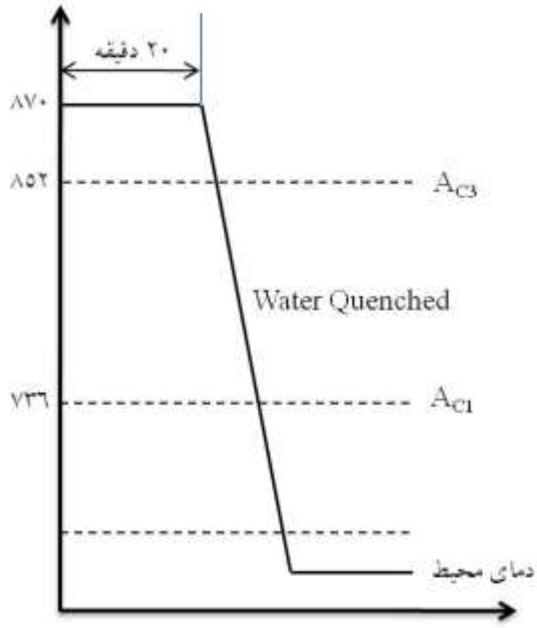
پس از آنالیز شیمیایی و قبل از انجام هر گونه عملیات حرارتی روی ورق ها، هر یک از ورق ها مطابق استاندارد مطرح شده ANNI/AWS/SAE/D8.9-97 برای انجام تست کشش – برش، بریده شدند. نمونه ی استاندارد این آزمایش در شکل (۳) آورده شده است.



شکل ۳ ابعاد نمونه‌ی استاندارد برای آزمایش کشش–برش (طول: ۱۴۰ ۱میلی‌متر؛ عرض: ٦۰ میلی‌مترو ضخامت ۱میلی متر)

عملیات حرارتی

برای رسیدن به ریز ساختار مارتنزیتی باید بر روی ورق ها عملیات حرارتی مناسب صورت گیرد و در اولین قدم برای تعیین سیکل مناسب عملیات حرارتی، یافتن دماهای بحرانی AC_1 و AC_3 است که برای این فولاد دماهای بحرانی AC_1 و AC_3 به ترتیب ۷۳٦ و ۸۵۲ درجه سلسیوس بود. در نهایت بهترین سیکل عملیات حرارتی فولاد، حرارت دادن فولاد در دمای ۸۷۰ درجه به مدت ۲۰دقیقه و نهایتا سرد کردن در آب (که حاوی ۲۰درصد نمک است) می باشد. سیکل عملیات حرارتی انجام گرفته روی نمونه در شکل (٤) قابل مشاهده است.

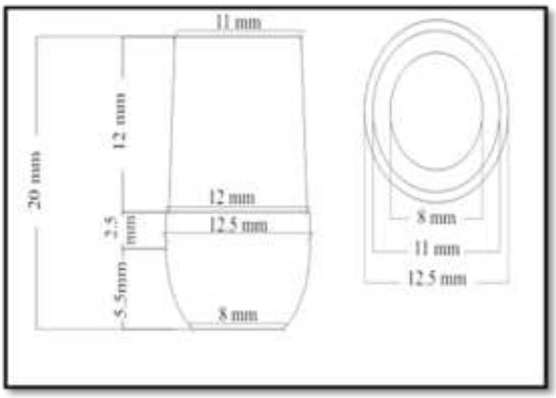


شکل ٤ شمایی از سیکل عملیات حرارتی مورد استفاده در این پژوهش

تجهیزات جوشکاری

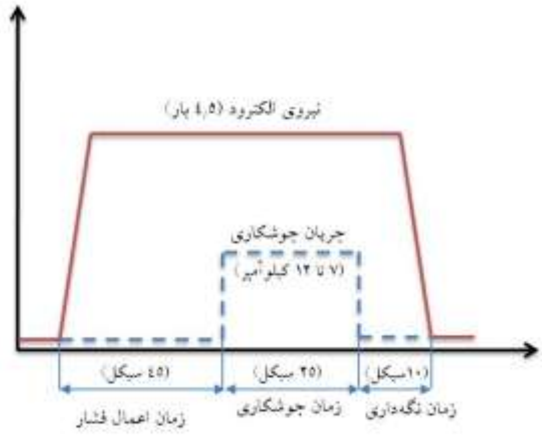
جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای در این آزمایش با دستگاهی ۱۲۰ کیلو واتی که فرکانس ۵۰ هرتز داشت، صورت گرفت.

الکترود مورد استفاده الکترود گروه A، مطابق دسته بندی RWMA از جنس آلیاژ مس–کروم–زیرکونیم با قطر نوک الکترود ۸ بود که انتخاب نوع، ابعاد و ترکیب شیمیایی آن بر اساس استاندارد صورت گرفته است. شکل (۵) شمایی از الکترود مورد استفاده در این پژوهش به همراه ابعاد الکترود را نشان می دهد.



شکل ۵ ابعاد هندسی الکترود

برای انجام عملیات جوشکاری، نمونه های عملیات حرارتی شده اکسیدزدایی می شود. زمان بهینه جوشکاری در این پژوهش ۲۵ سیکل است (معادل ۰٫۵ ثانیه) و مقدار فشار اعمالی هم ٤٫۵ بار می باشد. ورق ها به گونه ای روی هم قرار گرفته اند که ٤۵ میلی متر همپوشانی داشته باشند و دکمه جوش دقیقا در مرکز مستطیل قرار گیرد. به این ترتیب جریان اولیه روی ۷ کیلو آمپر تنظیم شد و به میزان ۰٫۵ کیلو آمپر برای هر جوش افزایش داده شد تا به حد نهایی ۱۲ کیلو آمپر رسید.از دیگر پارامترهایی که باید به ورودی دستگاه داده می شد، زمان اعمال فشار و زمان نگه داری است که به ترتیب ٤۵ و ۱۰ سیکل انتخاب شدند. شمایی از سیکل جوشکاری در شکل (٦) آورده شده است.



شکل ٦ سیکل جوشکاری که در این آزمایشات استفاده شد

متالوگرافی

برای بررسی ماکروساختار جوش و اندازه گیری دکمه جوش نمونه پس از پولیش مکانیکی با استفاده از محلول ٤درصد نایتال (٤ میلی لیتر اسید نیتریک و ٩٦ میلی لیتر اتانول) اچ می شود.

برای بررسی ریزساختار جوش نمونه پس از پولیش مکانیکی با محلول نایتال ۲ درصد (۲ میلی لیتر اسید نیتریک و ۹۸ میلی لیتر اتانول) اچ می‌شود.

برای فرآیند پولیش هم از سمباده های ۱۲۰۰، ۸۰۰، ٦۰۰، ٤۰۰، ۲۲۰، ۱۲۰، ۸۰ و نهایتاً نمد پولیش استفاده شد.

نتایج و بحث

ماکروساختار جوش

شکل (۷) ماکروساختار جوش را برای اتصال مشابه فولاد استحکام بالای پیشرفته مارتنزیتی در جریان پایین جوشکاری را نشان می دهد. همانطور که در شکل دیده می شود، به علت سیکل حرارتی فرآیند جوشکاری نقطه ای، یک ساختار ناهمگن در محل اتصال تشکیل می شود و در منطقه ی ذوب همه اتصالات، انجماد جهت دار با دانه های ستونی دارند که این ستون ها از اطراف دکمه جوش به سمت مرکز رشد کرده اند. علاوه بر آن در اتصالات مشابه فولاد استحکام بالای مارتنزیتی، ذوب شدن در ورق بالایی و پایینی یکسان است [18].



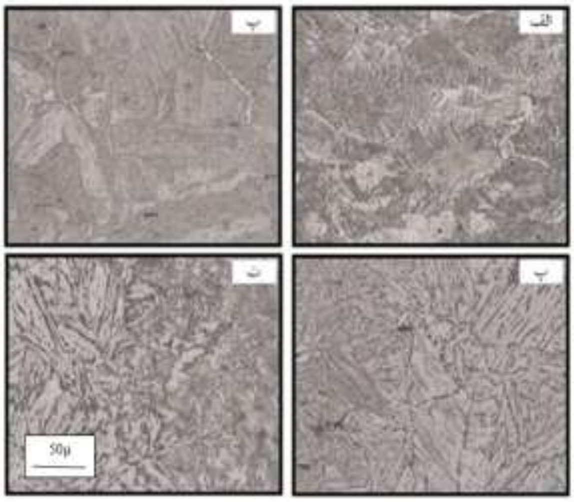
شکل ۷ ماکروساختار نمونه جوش اتصال مشابه M/M

ریزساختار جوش

شکل (۸–الف) ریز ساختار فلز جوش را نشان می دهد که در آن ریز ساختار مارتنزیتی و دانه های دندریتی دیده می شود که در این بخش درصد فاز مارتنزیتی در حدود ٦۰ درصد تخمین زده شده است. شکل (۸–ب) ریزساختار فلز زمینه می باشد که در آن فاز مارتنزیت سوزنی مشاهده می شود. این ساختار در فولادهای با درصد کربن پایین دیده می شود. واحدهای مارتنزیت در این عکس به شکل سوزن هایی هستند که درون بسته های بزرگتری قرار دارند و ریزساختار منطقه ذوب مشاهده شده برای هر یک از جوش های مورد مطالعه، ریزساختار مارتنزیتی است که انجماد جهت دار و سوزنی از مرز جوش به سمت مرکز دارد. در تحقیق انجام شده توسط Pouranvaria و همکارانش نیز ساختاری مشابه دیده شده است که میزان فاز مارتنزیت سوزنی در حدود ۳۵–٤۰درصد تخمین زده شده است.

شکل (۸–ب) نشان دهنده ریزساختار HAZ بحرانی و شکل (۸–پ) HAZ درشت دانه است. این اشکال نشان می دهد که، ریزساختار HAZ نیز از فاز مارتنزیتی تشکیل شده است اما با تکیه بر تحقیق Jim و همکاران با سرد شدن آستنیت و با توجه به عواملی چون درصد کربن و سرعت سرد شدن می تواند به فازهایی چون پرلیت و بینیت نیز تبدیل شود (که در این آزمایش این فازها مشاهده نشد). در منطقه HAZ بین بحرانی (شکل ۸–پ) با توجه به قرار گرفتن آستنیت در منطقه فریت – آستنیت، این فاز از کربن غنی می شود و سختی پذیری آن بالا می رود و همین مورد تشکیل مارتنزیت را نتیجه می دهد. در منطقه HAZ

درشت دانه (شکل ۸–ت) در جایی که دما بسیار بالاتر از AC_3 است، ریزساختار HAZ، ماتنزیت درشت دانه است. سرعت سرد شدن بالا و نیز افزایش اندازه دانه اولیه دگرگونی فازی را به سمت تشکیل مارتنزیت سوق می دهد.



شکل ۸ ریزساختار مناطق مختلف جوش مقاومتی نقطه‌ای فولاد استحکام بالای پیشرفته‌ی مارتنزیتی در بزرگ نمایی ۲۰۰ برابر الف) فلز جوش؛ ب) فلز پایه؛ پ) HAZ بین بحرانی و ت) HAZ درشت دانه

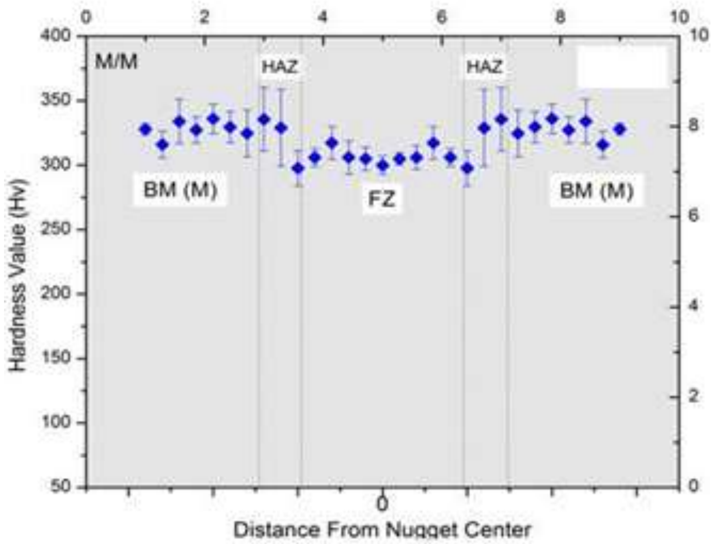
پروفیل سختی

در مورد فولادهای سخت شونده استحکام بالای مارتنزیتی سختی حدود ٤۰۰ویکرز است و با افزایش فاز مارتنزیتی این سختی افزایش می یابد [19].

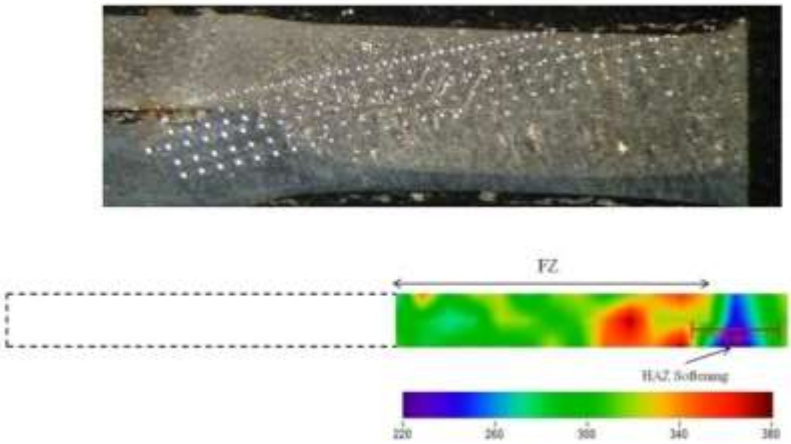
در فولاد St52 میزان عنصر منیزم زیاد یم باشد و از آنجایی که منیزیم پایدار کننده فریت است بنابراین پیش بینی می شود که فاز فریت در منطقه جوش افزایش یابد که این به منزله کاهش سختی در اثر تغییر فاز از مارتنزیت به فریت می باشد. شکل (۹) در مورد عدد سختی منطقه جوش است، با توجه به سختی نمونه ها برای اتصالات مشابه، سختی این فولادها در حدود ۲۰۰–۳۸۰ ویکرز است. بنابراین همانطور که پیش بینی می شد سختی منطقه جوش نسبت به فلز پایه کاهش پیدا کرده است.

شکل (۱۰) پروفیل سختی اتصالات مشابه این فولادها را نشان می دهد. همانطور که در این شکل مشخص است HAZ جوش ایجاد شده ، نرم می باشد.

از جمله علل نرم شدن HAZ می توان به، درشت بودن مارتنزیت در HAZ نسبت به فلز پایه ، تشکیل فازهای نرمتر بینیت و پرلیت و همین طور تمپر شدن مارتنزیت در اثر حرارت ایجاد شده توسط جوشکاری، اشاره کرد.



شکل ۹ پروفیل سختی اتصال مشابه فولاد استحکام بالای پیشرفته مارتنزیتی



شکل ۱۰ مسیر دنبال شده برای آزمایش سختی نقشه‌ی سختی به دست آمده برای اتصال مشابه M/M

تحلیل حالت شکست

دو حالت شکست برای جوش های نقطه ای وجود دارد.

حالت شکست محیطی: این شکست به دلیل جذب انرژی بالاتر، حالت دلخواه شکست برای جوش های نقطه ای می باشد.

حالت فصل مشترکی: این شکست در مواردی که بیرون زدگی و یا مواقعی که زمان یا جریان جوشکاری زیاد باشد، رخ می دهد. این شکست در شرایط بهینه ایجاد نمی شود.

تاثیرجریان جوشکاری بر حالت شکست. مشخصات فیزیکی و هندسی دکمه جوش نیز بوسیله متغیرهای جوشکاری مانند، جریان، زمان و نیروی الکترود کنترل می شود. تاثیر جریان جوشکاری بر حالت شکست نمونه های تحت آزمایش در جدول (۲) آورده شده است.

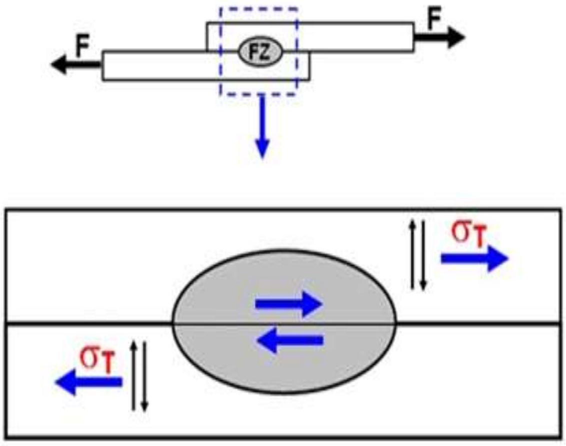
با توجه به جدول (۲)، در جریان های پایین شکست از فصل مشترک صورت می گیرد. علت این است که در جوش هایی که در زمان های جوشکاری پایین و جریان های جوشکاری پایین صورت می گیرد به علت پایین بودن قطر دکمه جوش، شکست از فصل مشترک صورت می گیرد. با افزایش جریان تا حد مشخصی برای هر نوع اتصال، حالت شکست از فصل مشترک به محیطی تغییر می کند اما در صورتی که جریان بیش از اندازه زیاد شود و بیرون زدگی مذاب رخ دهد، حالت شکست به حالت محیطی جزئی تبدیل می شود.

جدول ۲ تاثیر جریان جوشکاری بر حالت شکست (IF، شکست فصل مشترکی؛ PE ، شکست محیطی) اتصالات مشابه فولاد مارتنزیتی (برای زمان جوش ۲۵ سیکل و فشار الکترود ٤/۵ بار)

جریان جوشکاری (کیلوآمپر)	اتصال M/M
۷	IF
۷/۵	IF
۸	IF
۸/۵	IF
۹	IF
۹/۵	PE
۱۰	PE
۱۰/۵	PE
۱۱	PE
۱۱/۵	PE
۱۲	عدم برقراری اتصال

شکل (۱۱) مدل ساده ای برای توصیف تنش در دکمه جوش را نشان می دهد که از آن می توان نتیجه گرفت که هر چه سختی دکمه جوش بالاتر رود، تمایل به شکست فصل مشترکی کاهش می یابد. نیروی محرکه شکست محیطی، تنش کششی است که پیرامون دکمه جوش ایجاد

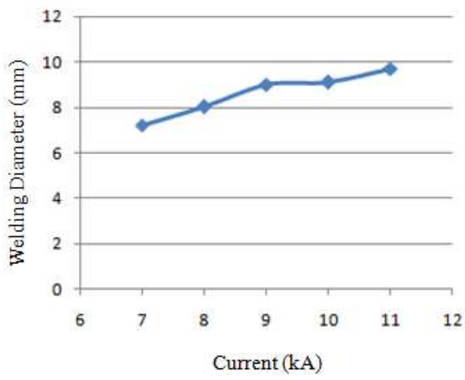
می شود. چرخش نمونه در طی آزمایش کششی-برشی ممان خمشی ایجاد می کند که این ممان عامل ایجاد تنش کششی در دکمه جوش می باشد. با افزایش نیروی کششی، در مکان های T که در HAZ یا فلز پایه قرار می گیرند، گردنی شدن در دو ورق به یک میزان رخ نمی دهد و تمرکز تنش ایجاد شده توسط این نابرابری، منجر به جداشدن دکمه جوش از یک ورق می شود. هرچه فلز پایه استحکام بیشتری داشته باشد، چرخش کمتر بوده و حساسیت آن به شکست فصل مشترک بالاتر است.



شکل ۱۱ مدل ساده برای توصیف تنش در دکمه‌ی جوش

شکل (۱۲) تاثیر جریان جوشکاری را بر قطر دکمه جوش نشان می دهد. همانطور که مشخص است در اتصالات مشابه فولادهای سخت شونده مارتنزیتی با افزایش جریان دکمه جوش افزایش می یابد و با توجه به آنچه جدول (۲) نشان می دهد حد بحرانی جریان برای تبدیل شکست فصل مشترکی به محیطی برای اتصالات مشابه برابر ۹,۵ کیلو آمپر است بنابراین قطر بحرانی شکست با توجه به شکل (۱۲) قابل تعیین است و این مقدار حدود ۹,۲ میلی متر است.

محل شکست اتصالات مشابه در مرز HAZ/FZ است. در قسمت هایی که پروفیل سختی در امتداد این اتصال تغییر زیادی نکرده است، تمرکز تنش در فصل مشترک دکمه جوش و نرم شدن شرایط شکست را تعیین می کند.



شکل ۱۲ تاثیر جریان جوشکاری بر قطر دکمه‌ی جوش برای اتصالات مشابه

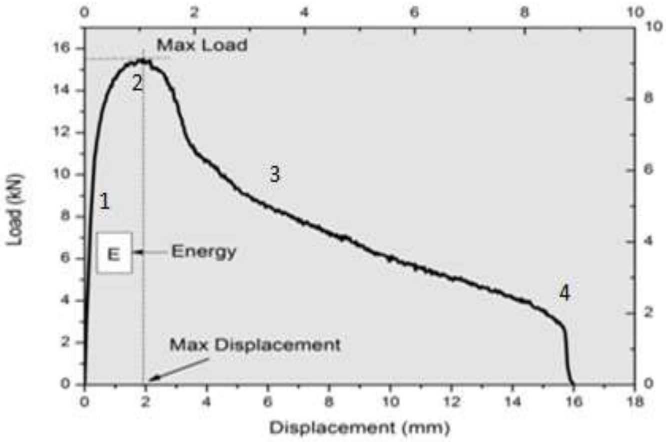
خواص مکانیکی جوش

مهمترین متغیری که در آزمایش کشش- برش مورد مطالعه قرار می گیرد، بیشینه نیروی کشش- برش است. در این پژوهش، علاوه بر این پارامتر، انرژی مربوط به آن نیز مورد بررسی قرار گرفتند. این پارامترها تنها در بیشینه نیرو محاسبه می شوند. جا به جایی در نیروی بیشینه، به عنوان نمادی برای انعطاف‌پذیری است و انرژی نیز نمادی برای توانایی جذب انرژی در جوش مطرح می شود. شکل (۱۳)، نمودار نیرو- جابه‌جایی به دست آمده برای یک نمونه‌ی جوش تحت آزمایش را به همراه متغیرهای اندازه‌گیری شده، نشان می‌دهد.

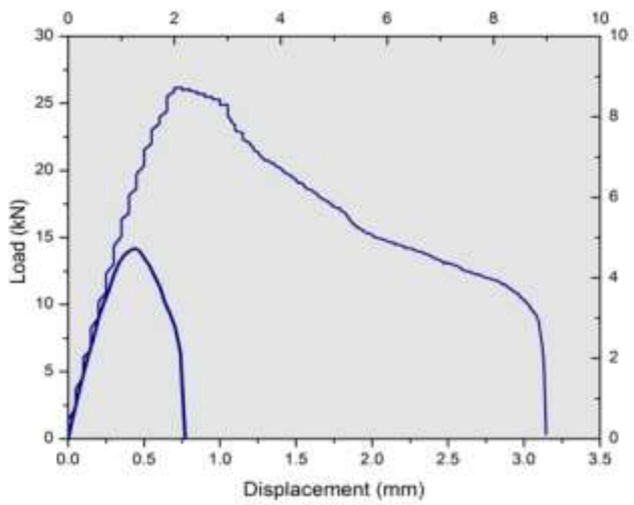
همانطور که مشخص است در قسمت ۱، تحت تاثیر نیروی کششی، تغییر شکل پلاستیک در نمونه مشاهده می شود و رابطه‌ی خطی بین نیرو و جابه جایی وجود دارد. درقسمت ۲، نیرو به بیش ترین مقدار خود می رسد که به آن نیروی کشش- برش گفته می شود. مقادیر نیرو در مرحله (۲)، به شدت تحت تاثیر ممان خمشی است که تنش‌هایی در داخل و اطراف جوش ایجاد می کند. با رسیدن به TSF، تنش در تمام اتصال موضعی شده تا جایی که شکست رخ می دهد. در قسمت ۳، در صورتی که نیرو به صورت ناگهانی به صفر می رسید، آنگاه نوع شکست، شکست فصل مشترکی بود. به این علت که دو ورق کاملاً از هم جدا شده‌اند. در قسمت ٤ ، ترک در کل ضخامت رخ

می دهد که دلیل این اتفاق، چرخش جوش در راستای عمود بر صفحه‌ی ورق‌هاست. این چرخش تا ۹۰ درجه ادامه پیدا کرده و پس از آن به فلز زمینه می رسد.

شکل (١٤) نمونه ای از نمودار نیرو–جابجایی مربوط به شکست در حالت شکست فصل مشترکی و محیطی را نشان می دهد که جوشکاری در جریان ۱۰,۵ و ۸,۵ کیلو آمپر صورت گرفته است. برای شکست فصل مشترکی، همانطور که نمودار شکل (١٤) نشان می دهد قبل از رسیدن به نقطه ماکزیمم یک منطقه ی غیر خطی وجود دارد که مربوط به تغییر شکل پلاستیک و کرنش سختی است. نقطه ی بیشینه در نمودار نشان دهنده فصل مشترک است که بیشینه تمرکز تنش را دارد. برخلاف نمودار در حالت فصل مشترکی، در این حالت نمودار دارای یک دنباله ی طولانی است که با نحوه‌ی شکست بیان شده بعد از آغاز رشد ترک، متناظر است. همانطور که مشاهده می شود بعد از رسیدن به نقطه‌ی بیشینه نیرو، نیرو به صورت تدریجی کاهش می یابد. پس از رسیدن به بیشینه نیرو، به دلیل پارگی فلز پایه، جذب انرژی هنوز ادامه دارد. این امر موجب افزایش قابلیت جذب انرژی کل جوش نقطه‌ای می‌شود.



شکل ۱۳ نمودار نیرو- جابه جایی نمونه در آزمایش کشش- برش مربوط به اتصال مشابه M/M

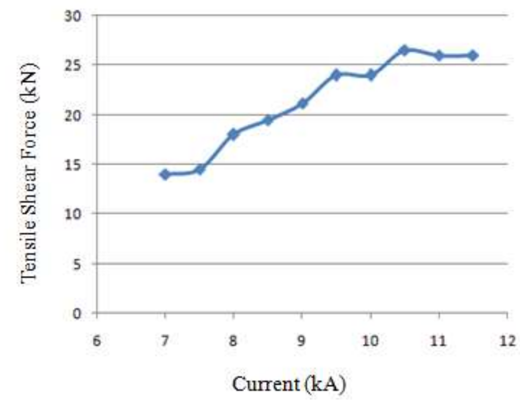


شکل ١٤ نمودار نیرو- جابه‌جایی بالایی؛ شکست فصل مشترکی (IF) و پایینی؛ شکست محیطی (PF) نیروی کل شکست برای حالت محیطی ۱۲,۵کیلو نیوتن و برای حالت شکست فصل مشترکی۲۷ کیلو نیوتن محاسبه شد

تاثیرجریان بر پارامترها

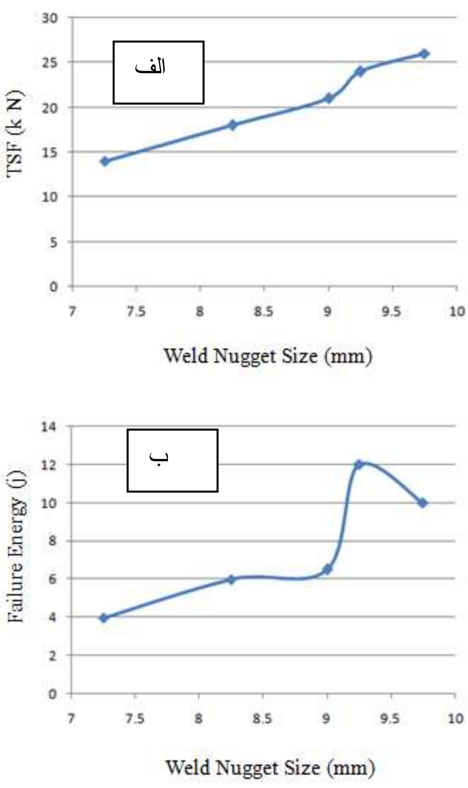
شکل (۱۵) به نمودارهای TSF برحسب جریان جوشکاری را برای اتصالات مشابه فولاد استحکام بالای پیشرفته مارتنزیتی را دارد. آنطور که منحنی ها نشان می دهند، برای اتصالات M/M، اتصالات انجام گرفته در جریان ۱۲ کیلوآمپر استحکام مناسبی نداشتند و در حقیقت اتصالی بین ورق ها بر قرار نشد. شاید دلیل آن را بتوان گرم شدن بیش از اندازه و بیرون زدگی مذاب دانست. در نتیجه‌ی بیرون زدگی، فرورفتگی الکترودها در سطح ورق ها بیشتر شده و ترک های سطحی به وجود آمده است که شکست ورقها را تحت تاثیر قرار می دهند. همان گونه که در شکل مشخص است، برای اتصالات M/M ، در جریان ۱۰/۵ کیلو آمپر نیرو به بیش ترین مقدار خود، یعنی ۲۶/۵ کیلو نیوتن را دارد که با کمتر از درصد خطا با نتایج Pouranvaria و همکارانش همخوانی دارد.

با توجه به این منحنی ها می توان اینگونه نتیجه گرفت که با افزایش جریان جوشکاری، در محدوده مورد بررسی، در ابتدا استحکام سریعا افزایش یافته و با افزایش بیشتر جریان جوشکاری استحکام و انرژی شکست کاهش می یابد.



شکل ۱۵ بیشینه نیروی شکست بر حسب جریان جوشکاری در طول آزمایش کشش- برش برای اتصالات مشابه فولاد استحکام بالای پیشرفته مارتنزیتی

شکل (۱٦) تاثیر اندازه دکمه جوش بر ظرفیت تحمل نیرو و قابلیت جذب انرژی در اتصالات مشابه فولادهای پیشرفته سخت شونده مارتنزیتی را نشان می دهد. آنطور که منحنی ها نشان می‌دهند، با افزایش اندازه‌ی دکمه‌ی جوش، نیروی بیشینه نیز افزایش پیدا می کند. نقطه‌ی بیشینه در نمودار نیرو- جابه جایی آزمایش کشش- برش در حالت شکست فصل مشترکی، اشاعه‌ی ترک به درون دکمه ی جوش و در حالت محیطی، متناظر با رشد ترک حول دکمه ی جوش است. در حالت کشش فصل مشترکی هر چه اندازه ی دکمه بیش‌تر باشد، مقاومت فصل مشترک به برش بیشتر می شود و در حالت محیطی با افزایش قطر دکمه، مقاومت دکمه در برابر چرخش بیشتر شده و از طرفی سطح تحمل کننده‌ی نیرو افزایش میابد و در نتیجه نیروی لازم برای شروع شکست افزایش می یابد. در هر دو حالت و پیش از وقوع بیرون زدگی مذاب، افزایش قطر دکمه موجب افزایش نیرو و انرژی لازم برای شکست می شود و به عنوان اصلی‌ترین عامل کنترل کننده ی استحکام و انرژی شکست جوش های نقطه ای مطرح است.



شکل ۱٦ اثر اندازه‌ی دکمه‌ی جوش بر الف) نیروی بیشنه‌ی شکست و ب) انرژی شکست برای اتصالات مشابه M/M

نتیجه گیری

با توجه به آنچه که در این قسمت ذکر شده است می توان تغییرات پارامترهایی چون جریان و زمان جوشکاری به جوشی مناسب دست یافت.از جمله نتایج این تحقیق، عبارتست از:

۱. در اتصالات مشابه فولادهای پیشرفته استحکام بالای مارتنزیتی HAZ نرم تر می شود.
۲. در جریان های پایین شکست فصل مشترکی می باشد ولی به محض رسیدن به جریان های بالاتر از ۹٫۵کیلو آمپر شکست محیطی صورت می گیرد. ولی در جریان های خیلی بالا اصلاً اتصالی تشکیل نمی شود.
۳. قطر دکمه جوش با افزایش جریان افزوده می شود و در اتصالات فولادهای پیشرفته سخت شونده مارتنزیتی در حالتی که جریان بحرانی (۹٫۵ کیلو آمپر) اعمال شود اندازه بحرانی دکمه جوش حدود ۹٫۲ میلی متر است.
٤. نمودار نیرو جابجایی نمونه ها که در حال کششی برشی صورت می گیرد نشان می دهد که نیروی شکست برای حالت فصل مشترکی ۱۲٫۵کیلو نیوتن و برای شکست محیطی ۲۷کیلو نیوتن محاسبه شده است.
۵. نیروی شکست با افزایش جریان جوشکاری افزایش می یابد ولی در جریان های بسیار بالا کمی کاهش می یابد به طوری که بیشترین نیرو در اتصالی دارد که در آن جریان جوشکاری ۱۰٫۵کیلوآمپر باشد که مقدار آن حدود ۲٦٫۵ کیلو نیوتن است.
٦. با افزایش قطر دکمه جوش نیرو افزوده می شود ولی اگر این مقدار از ۹٫۲میلی متر عبور کند این نیرو به شدت کاهش می یابد.

مراجع

۱. اویسی م.، بنی مصطفی عرب ن.، پایگانه غ.، "پیش بینی و بهینه سازی اندازه قطر دکمه جوش در جوشکاری مقاومتی نقطه ای بر ورق مورد استفاده در صنعت کشتی سازی با استفاده از طراحی آزمایشات"، اولین همایش ملی توسعه سواحل مکران و اقتدار دریایی جمهوری اسلامی ایران، کد مقاله٤۰۰۵، بهمن (۱۳۹۱).

2. Chao Y.j. "Ultimate Strength and Failure Mechanism of Resistance Spot Weld Subjected to Tensile, or combined, Tensile/Shear Loads *", Journal of Engineering Materials and Technology* , Vol. 125.No. 2, pp. 125-133, (2003).
3. Pouranvari M., Asgari H., " Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot *", Journal of Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 12.No.3, pp. 223-231, (2003).
4. Agate S., Hang H.A., "Effect of welding current in spot welding", *Welding Journal*, Vol.7.No. 2, pp. 179-183, (2003).
5. Dodders S., Bryghmads T. Herman's C. Liefooghe H. Van der Auweraer, Desmet W. Finite Elem. *Anal Des*. Vol. 6.No. 2, pp. 670-682, (2006).
6. American Welding Society, AWS Handbook, Chapter17, (1997).
7. Sun W., Stephens X., Khaleel F.V., "Effect of fusion zone size and failure mode on peak load and energy absorbtion of advanced high strength steel spot welds under lap shear loading conditions", *Eng Failure*, Vol. 15.No. 4, pp. 356-367, (2008).
8. Tomorrow M.D., "Resistance Spot Welding of Coated High Strength Dual Phase Steel", *Welding*

Journal, Vol. 85.No. 8, pp. 162-177, (2006).

9. Khan E.,"Spot Welding of Advanced High Strength Steels", *Mechanical Engineering*, University of Waterloo: Ontario. Vol. 27.No. 3, pp. 128-139, (2007).
10. Ghosh P.K., Guppy P.C, Paw O., Avpyr R., Dived V., "Influence of Weld Thermal Cycle on Properties of Flash Butt Welded Vn-Cr-Vo Dualphase Steel" , *ISIJ International*, Vol. 33.No. 7, pp. 33-50, (1993).
11. Miller Welds, Handbook of RS V. (2005).
12. Towade G.K.C., Brew S.D., add Tee A., "Robust Schedule for Spot Welding Zinc Coated Advance High Strength Automotive Steel". *SEEA*. Vol. 11.No. 3, pp. 225-240, (2005).
13. Pouramvari M., "Factors affecting mechanical properties of resistance spot welds", *Materials Science and Technology*, Vol. 13.No. 6, pp 65-82, (2009).
14. Tee H., Kim N., Tee T.S., "Overload Failure Curve and Fatigue Behavior of Spot- Welded Specimen", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 72. No. 8, pp.72-83, (2005).
15. Khan E., Kumrz E., Her Y., Chap K., Slerlhmer N., "Monitoring the Effect of RSV Pulsing on HAS using FEE Software". *SAE Technical Paper*, Vol. 8.No. 3, pp. 92-108, (2007).
16. Hofmam K., Serest V., Ornerier CL, Vilwaire S., Procurer E., "EC or DC_ for resistance welding Dual Phase DP600", *Welding Journal*, Vol. 6.No. 3, pp. 84-95, (2005).
17. Kumitige K., Yamaulhi N., Take T.L., Nagger N., "Softening in Weld Heat Affected Zone of Dual Phase Steel Sheet for Automotive Wheel Rim", *SAE Transactions*, Vol. 21.No.3, pp. 1063-1067, (2004).
18. Jim H., "Microstructure Evolution During Processing of Dual Phase and TRIP Steels", id Materials Engineering. *University of British Columbia*. pp34-45, (2004).
19. Pouranvari M., Marashi S.P.H., Safanama D.S., "Failure mode transition in AHSS resistance spot welds", *Materials Science and Engineering A* , Vol. 528.No. 29, pp. 8337– 8343, (2011).